

# 传导冷却无绝缘高温超导二极磁体的研制

杜卓越<sup>1,2,3</sup>, 陈玉泉<sup>1</sup>, 吴 巍<sup>1</sup>, 吴北民<sup>1</sup>, 欧贤金<sup>1</sup>, 梅恩铭<sup>1</sup>, 马力祯<sup>1</sup>,  
马 鹏<sup>4</sup>, 李 超<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(3. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003)

(4. 西安聚能超导磁体科技有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘 要:** 本工作研制了一台中心磁场为 1.5237 T 的传导冷却型的无绝缘高温超导 (HTS) 二极磁体, 它主要由室温铁芯、高温超导双饼线圈以及低温恒温器等组成。铁芯的极头采用圆柱形结构, 极头之间的距离为 120 mm。其中, 每个线圈匝数为 176 匝, 磁体的运行电流为 286 A。线圈冷体由一台 GM 制冷机进行冷却, 运行温度小于 20 K。本工作主要介绍高温超导磁体的设计以及所使用高温超导带材的载流性能, 并对无绝缘线圈在装入铁芯前和装入铁芯后的充电和放电特性进行了测试研究。通过测试得到了该磁体充电延迟时间常数, 并且测试结果表明, 在励磁电流为 286 A 时, 中心磁场强度达到了设计要求。

**关键词:** 二极磁体; 高温超导; 无绝缘; 传导冷却

中图分类号: TM26<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)10-3900-05

低温高密度核物质的研究是基于近代物理研究所大科学装置 HIRFL-CSR 的崭新研究领域, 该研究需要一台超导谱仪二极磁体提供较大的均匀磁场区域, 再通过先进的探测器系统测量偏转的带电粒子的三维径迹。随着超导磁体在加速器领域使用日益广泛, 尤其是高温超导材料制备技术和工艺的日趋成熟, 大量的超导设备采用高温超导技术。与低温超导相比较, 高温超导有较高的温度裕度, 有较高的临界磁场以及较高的载流能力, 但是高温超导磁体的失超探测和保护技术是制约其发展的难点。

为了解决高温超导磁体的失超保护问题, 提出了无绝缘磁体的概念, 并逐渐获得广泛应用。2019 年, 美国强磁场实验室利用 14.4 T 的高温超导无绝缘磁体, 内插在由常规磁体产生的 31.1 T 的背景磁场中, 最终获得 45.5 T 的稳态磁场<sup>[1]</sup>, 创造了稳态磁场的最新世界纪录; 2020 年, 中国科学院电工研究所利用无绝缘高温超导磁体和低温超导磁体组合产生中心磁场高达 32.35 T 的全超导磁体<sup>[2]</sup>。在加速器应用领域, 韩国的基础科学研究所采用高温超导带材与不锈钢带并绕的方式, 研制了无绝缘高温超导四极磁体和六极磁

体, 应用于稀有同位素研究装置的强辐照区域<sup>[3]</sup>。另外, 一些研究机构制订了设计方案, 采用无绝缘磁体技术制备二极磁体和高温超导回旋加速器等<sup>[4,5]</sup>。

随着无绝缘高温超导磁体的发展以及取得的成果, 无绝缘磁体技术在稳态磁场领域越来越引起重视, 近代物理研究所结合项目需求, 同时为了掌握无绝缘磁体技术, 研制了一台传导冷却型的无绝缘高温超导二极磁体。它由室温铁芯和高温超导线圈组成, 其中线圈采用 YBCO 带材与紫铜带并绕的方式绕制。本研究主要介绍磁体的设计, 高温超导材料的基本性能, 并对无绝缘线圈在装入铁芯前和铁芯后的充、放电特性进行了测试研究。

## 1 高温超导二极磁体的设计

利用室温铁芯主导磁感应强度的大小和均匀度, 铁芯极头采用圆柱形结构, 极头之间距离为 120 mm, 高温超导无绝缘线圈提供励磁所需的安匝数。图 1 所示是二极磁体的整体机械图, 一台 GM 两级制冷机位于铁轭侧面的阀箱中, 通过传导冷却低温恒温器中的线圈, 运行温度小于 20 K。表 1 列出了该磁体的主要设计参数。

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 新一代强流重离子加速器关键束流物理和核心技术预研 (Y910350101); 中国科学院战略先导 B 项 (低交流损耗超导磁体, Y815010XD1); 国家自然科学基金 (11927901); 广东省引进创新创业团队计划 (2016ZT06G73)

作者简介: 杜卓越, 男, 1991 年生, 博士, 中国科学院近代物理研究所加速器技术中心磁铁技术室, 甘肃 兰州 730000, 电话: 0931-4969022, E-mail: 18793178580@163.com

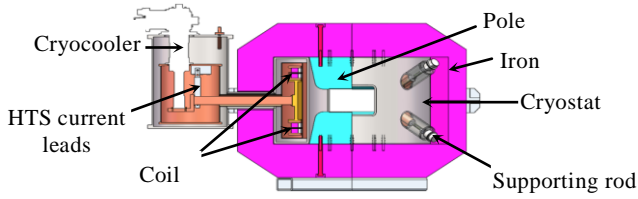


图 1 高温超导二极磁体机械设计图

Fig.1 Mechanical design drawing of HTS dipole magnet

表 1 二极磁体的主要设计参数

Table 1 Main design parameters of dipole magnet

Parameter	Value
Inner diameter of coil/mm	480
Magnetic field in gap/T	1.5237
Number of turns in each coil	176
Total number of turns	704
Operating current/A	286
Stored energy/kJ	24.5 (designed value)
Peak perpendicular field/T	0.96

该二极磁体包含 4 个相同的双饼线圈，每一个双饼线圈由一条紫铜带和一条 YBCO 带材共绕形成，紫铜带和 YBCO 带材的宽度是 12 mm，厚度分别是 0.1 和 0.28 mm，双饼线圈的上下饼之间用 1 mm 厚的 G10 材料绝缘。线圈绕制在 304 不锈钢材料的骨架上，然后通过支撑筒连接，悬挂于真空杜瓦中，用 GM 制冷机进行传导冷却。对于铁芯主导型磁体，磁场分布主要由铁芯极头形状决定。由于磁体运行模式为稳态，因此计算和实际加工时铁芯处理为实心铁。铁芯和极头均选用 DT4 的电工纯铁，加工时主要使用线切割技术，然后进行分块组装，上下铁芯之间以及上下铁芯与上下极头之间用螺栓连接。由于铁芯的饱和效应，磁体的电感与电流之间存在非线性关系，图 2 是用有限元软件计算得到不同电流所对应的电感和中心磁场。在 286 A 运行电流下，线圈最大垂直磁场为 0.96 T，有足够大的电流裕度确保磁体稳定运行。

## 2 高温超导材料性能介绍

高温超导二极磁体线圈使用上海超导公司生产的第二代高温超导材料 YBCO，宽度为 12 mm，厚度 0.28 mm。图 3 所示是超导带材结构示意图，它采用物理气相沉积法制备，利用哈氏合金为基底材料，在其上制备缓冲层和具有双轴结构的种子层，成为良好的基板，然后用激光脉冲沉积技术制备高温超导薄膜<sup>[6]</sup>，最后用银包覆保护超导层，所采用的组成部分均为非磁性材料<sup>[7]</sup>。

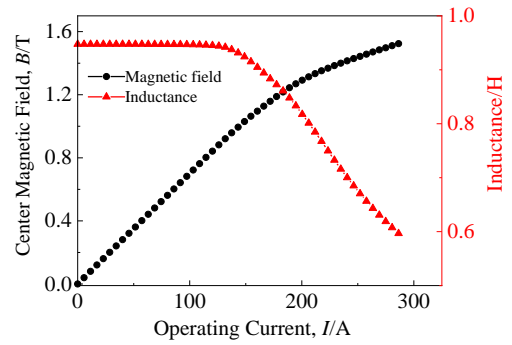


图 2 电感和中心磁场与运行电流的相关性

Fig.2 Dependence of the inductance and center magnetic field on the operating current

单个双饼线圈需要带材长度为 280 m，因此选择单根为 300 m 的带材制备一个双饼线圈，确保线圈内部没有接头。选用的超导带材有良好的载流性能，在液氮温度自场条件下，沿着带材长度方向，采用无接触测量带材的临界电流，电流最小值为 363 A。图 4 所示是 4.2 和 20 K 条件下，临界电流与垂直磁场的关系曲线。超导材料的临界电流遇到外磁场会逐渐减少，并由磁场强度大小和磁场方向与带材的夹角共同决定，垂直于超导带材宽度方向的磁场影响较大。除此之外，后处理用紫铜封装的超导带材力学性能良好，抗拉应力为 400 MPa，抗拉应变为 0.4%，最小弯曲直径为 15 mm。

## 3 无绝缘线圈的充、放电特性

4 个双饼线圈经过组装后，通过拉杆悬挂于低温恒温器中，使用 GM 制冷机对其进行冷却（见图 5）。最终经过 4 d 时间，线圈从室温冷却至 6 K。然后开始线圈励磁测试，采集每个线圈的端电压信号和磁体中心位置的磁场。

无绝缘线圈的充电和放电特性通常采用集总电路模型进行分析<sup>[8]</sup>，它主要由电感和电阻并联组成，电阻一般称为特征电阻，是无绝缘线圈的超导带材与紫

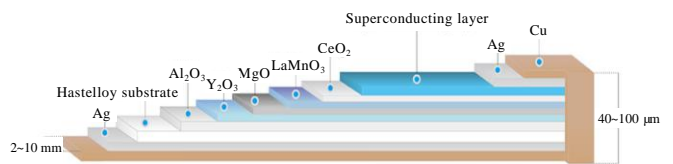


图 3 YBCO 涂层导体结构

Fig.3 Structure of the YBCO coated conductors

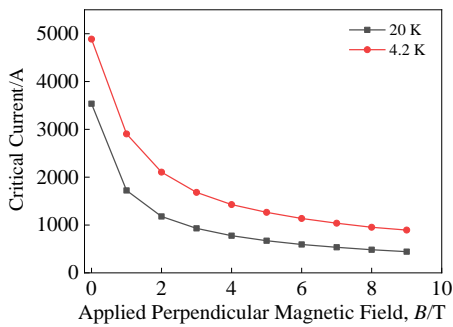


图 4 临界电流与磁场相关性

Fig.4 Dependence of the critical current on the applied magnetic field



图 5 线圈杜瓦组装测试

Fig.5 Test of coil and Dewar assembly

铜带接触电阻总和<sup>[9]</sup>。因此，线圈电流由径向电流和环向电流组成，在充电过程中，一部分电流由于匝间分流沿径向流通，当处于完全充电状态时，电流全部沿环向的超导层流动。

线圈以 0.1 A/s 的充电速率分步长加载电流到 300 A。使用霍尔片连续采集线圈的中心磁场。图 6 所示为励磁过程中采集的电流、线圈总电压和磁场，其中对磁场数据进行了归一化处理。无绝缘线圈的充电过程分为 2 个阶段：(1) 电源电流加载阶段，表现电压和磁场快速的增加；(2) 电源电流稳定阶段，表现为电压快速衰减和磁场缓慢增加，需要漫长的时间磁场达到稳定状态。因此，无绝缘线圈的充电时间为上述 2 个阶段的时间之和。

无绝缘线圈的 2 个充电阶段的电压可以通过解析表达的方程式 (1) 进行描述：

$$\begin{cases} V(t) = Lk(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), & 0 \leq t \leq t_0 \\ V(t) = Lke^{-\frac{t}{\tau}}(e^{\frac{t_0}{\tau}} - 1), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

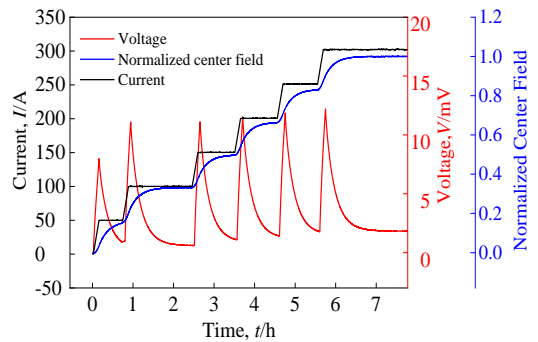


图 6 线圈充电测试结果

Fig.6 Charging test results of the coil

其中， $L$  为线圈电感， $k$  为充电速率， $t$  为充电的时间， $t_0$  为电源电流加载时间， $\tau$  为时间常数。为了获得线圈的充电延迟时间常数，以 0.1、0.3 和 0.5 A/s 分别充电至 25 A。图 7 所示为充电至 25 A 的充、放电特性曲线，通过数据拟合，得到时间常数为 880 s，特征电阻为 0.27 mΩ。

#### 4 二极磁体的充、放电特性

组装线圈经过低温励磁测试，结果表明达到设计要求。随后将铁芯与线圈进行总装配（见图 8），再次进行励磁测试。采用与线圈杜瓦组装相同的测试方案，磁体中心放置霍尔片测量磁场，同时采集线圈的电压和表面温度。与线圈杜瓦组装相比较，二极磁体的特征电阻认为保持不变，但是磁体的电感并不保持恒定，随着电流的增大逐渐减小（见图 2），使得二极磁体的充放电特性明显不同于组装线圈。

当线圈降温至工作温度时，以 0.1 A/s 充电速率分步长加载电流到 300 A，分别从 0 A 加载电流到 50 A，从 50 A 加载到 150 A，最后加载至 300 A，图 9 为充放电曲线。

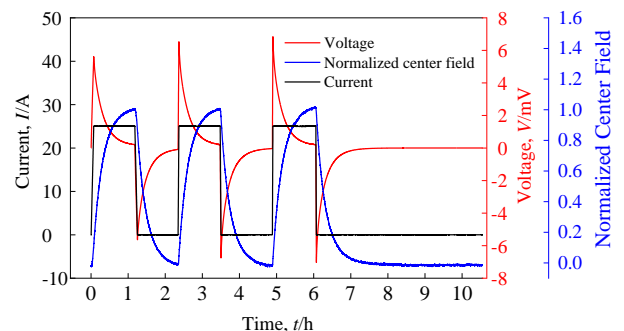


图 7 线圈的 25 A 充电和放电测试结果

Fig.7 Charging and discharging test results of the coil at 25 A

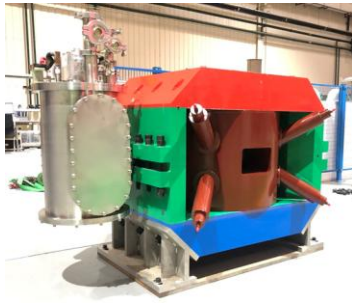


图 8 二极磁体示意图

Fig.8 Schematic view of the dipole magnet

在电流 0~50 A 和 50~150 A 阶段,线圈的电感相差不大。通过对这 2 个阶段充电过程的电压和磁场数据分析可知,测量的电压曲线与式 (1) 充电电压曲线趋势一致。测试结果还表明,以相同的充电速率加电时,50~150 A 阶段的最大电压明显大于 0~50 A 阶段,这是由于充电电流幅值越大,径向分流越大,相应的电压也越大。电流在 150~300 A 加载的过程中,由于电感逐渐减小(见图 2),磁场和电压数据与电路模型预测的趋势差别明显。

为了减少二极磁体的充电时间,以 0.1 A/s 的充电速率连续充电到设计电流 286 A。图 10 所示为整个加电过程中的电压和磁场曲线,利用电路和磁场模型分析充电过程磁场和电压的变化趋势一致,但是电源电流稳定阶段以后,模拟与实验数值差别明显,一个原因是励磁时线圈存在温升,导致特征电阻变大,另一个原因是屏蔽电流产生磁场的影响。如果以 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  作为失超标准,磁体总电压应低于 112 mV,其中最大实验测试电压值为 53.16 mV,整个充电过程实测电压小于该失超判据。

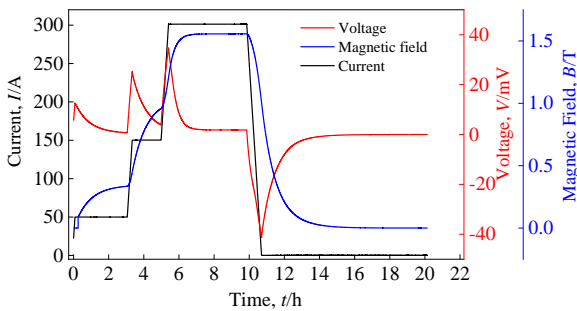


图 9 分步长加载到 300 A, 二极磁体充电和放电测试结果

Fig.9 Charging and discharging test results of the dipole magnet up to 300 A in steps

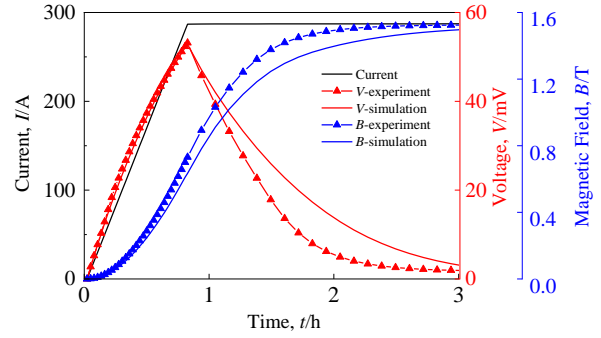


图 10 二极磁体的 286 A 充电测试结果

Fig.10 Charging test results of the dipole magnet at 286 A

经过电源电流加载阶段,电流达到 286 A,此时中心磁场仅为 0.7312 T。随着时间的增加,径向电流逐渐减小,环向电流逐渐增大,电流最终完全流过超导层,线圈电压减小为 0。磁场达到稳定状态,中心磁场为 1.526 T。经过 4 h 后,中心磁场达到设计值。关于二极磁体的充电时间,由于电感的变化,通过粗略的中心磁场测量为 4 h,更准确的充电时间会考虑三维空间的磁场的大小和均匀度进行确定。

### 5 结论

1) 研制了一台传导冷却型的无绝缘高温超导二极磁体,对线圈和铁芯组装前后分别进行了低温励磁测试。装入铁芯前的无绝缘线圈可以稳定运行,通过对线圈的 25 A 励磁测试数据分析,可得到线圈的时间常数为 880 s。

2) 线圈装入铁芯后对其进行了低温励磁测试,当电流励磁到 286 A 时,中心磁场达到了 1.526 T。测试得到磁体充电时间为 4 h。由于铁芯的磁饱和效应,线圈电感随电流增大逐渐减小,导致磁体的电压和磁场变化与线圈测试不同。

3) 通过对二极磁体的初步测试,充分了解高温超导二极磁体的无绝缘特性,为后续全三维空间的磁场均匀度测量提供了测试基础。

### 参考文献 References

[1] Hahn Seungyong, Kim Kwanglok, Kim Kwangmin *et al.* *Nature*[J], 2019, 570(7762): 496  
 [2] Liu Jianhua, Wang Qiuliang, Qin Lang *et al.* *Superconductor Science and Technology*[J], 2020, 33(3): 1  
 [3] Choi Jongho, Lee Sangyoon, Lee Chan Kyeong *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2018, 33(3): 1  
 [4] Park Jeonghwan, Hahn Garam, Jeseok Bang *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2020, 30(4): 1

- [5] Song H, Burkhardt E E, Borden T *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2015, 25(3): 1 (稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S4): 572
- [6] Wang Wei(王伟), Liu Linfei(刘林飞), Li Yijie(李贻杰). *Modern Physics*(现代物理知识)[J], 2018, 30(3): 51 [8] Hahn S, Park D L, Bascunan J *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2010, 21(3): 1592
- [7] Zhang Yongjun(张永军), Zhang Pingxiang(张平祥), Li Chengshan(李成山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* [9] Wang Xudong, Hahn Seungyong, Kim Youngjae *et al. Superconductor Science and Technology*[J], 2013, 26(3): 35 012

## Research and Development of a Conduction-Cooled, No-Insulation HTS Dipole Magnet

Du Zhuoyue<sup>1,2,3</sup>, Chen Yuquan<sup>1</sup>, Wu Wei<sup>1</sup>, Wu Beimin<sup>1</sup>, Ou Xianjin<sup>1</sup>, Mei Enming<sup>1</sup>, Ma Lizhen<sup>1</sup>, Ma Peng<sup>4</sup>, Li Chao<sup>4</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3. Huizhou Research Center of Ion Sciences, Huizhou 516003, China)

(4. Xi'an Superconducting Magnet Technology Co., Ltd, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** A conduction-cooled and no-insulation high temperature superconducting (HTS) dipole magnet with a 1.5237 T center magnetic field has been developed. It consists of a room temperature iron, HTS double pancake coils and a cryostat. The poles of iron utilize the cylindrical structure and the distance between two poles is 120 mm. Each coil has 176 turns and the nominal operating current is 286 A. The cold mass of coil is cooled by using a GM cryocooler and the operating temperature is below 20 K. This work describes the HTS dipole magnet design and the carrying-current capacity of YBCO tape and reports the charging and discharging test research of the no-insulation coil with and without iron core. The charging delay time constant is acquired by the experiment and the test result shows that the center magnetic field meets design requirement at the operating current of 286 A.

**Key words:** dipole magnet; HTS; no-insulation; conduction-cooled

---

Corresponding author: Wu Wei, Ph. D., Professor, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China, Tel: 0086-931-4969022, E-mail: wuwei@impcas.ac.cn